

Проектирование, сооружение и эксплуатация систем трубопроводного транспорта

Designing, construction and operation of pipeline transport system

25.00.19 Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ
(технические науки)

DOI: 10.31660/0445-0108-2021-1-77-89

УДК 621.6.05

Анализ напряженно-деформированного состояния вертикального заземлителя для вечномерзлых грунтов при выталкивающих нагрузках

И. С. Сухачев¹, П. В. Чепур^{1*}, А. А. Тарасенко¹, А. А. Грученкова¹,
Юхай Гуань²

¹Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

²Китайский нефтяной университет, г. Циндао, Китай

*e-mail: chepurpv@tyuiu.ru

Аннотация. В работе предложены конструкция, расчетная схема и модель вертикального заземлителя с лепестковыми упорами для вечномерзлых грунтов. Реализация модели осуществлена с использованием МКЭ-пакета ANSYS. В расчетной схеме учитывается система «грунт — заземлитель», упругопластические свойства грунта учитываются моделью Друкера — Прагера. При моделировании работы грунтов основания было принято условие прочности Мизеса, согласно которому эквивалентное напряжение определяется с учетом гидростатического обжатия материала. В работе приняты следующие граничные условия: массив грунта, имеющий форму цилиндра, жестко закреплен по нижней грани и по боковой поверхности цилиндра. Расчеты выполнены для 5 типоразмеров заземлителей. Получены карты распределения напряжений в металлоконструкции заземлителя: стержне и лепестках-упорах, а также значения перемещений заземлителя в грунтовом массиве. Установлены зависимости между максимальными эквивалентными напряжениями в лепестках заземлителя и величиной вертикального перемещения в грунтовом основании, также установлена величина перемещения заземлителя, при которой в зоне примыкания лепестков к стержню действующие эквивалентные напряжения достигают критических значений.

Ключевые слова: заземлитель; вечномерзлый грунт; прочность; метод конечных элементов

Analysis of the stress-strain state of a vertical ground electrode system for permafrost soils under pushing loads

Ilya S. Sukhachev¹, Petr V. Chepur^{1*}, Aleksandr A. Tarasenko¹,
Alesya A. Gruchenkova¹, Yuhai Guan²

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

²China University of Petroleum, Qingdao, China

*e-mail: chepurpv@tyuiu.ru

Abstract. The article proposes the design, design scheme and model of a vertical ground electrode system with lobe lugs for permafrost soils. The model was implemented using the ANSYS software. In the design scheme, the soil — ground electrode system is taken into account, the elastic-plastic properties of the soil are taken into account by the Drucker — Prager model. When modeling the work of the foundation soils, the Mises strength condition was adopted, according to which the equivalent stress is calculated under the condition of the material hydrostatic compression. The following boundary conditions are accepted: a cylinder-shaped soil mass is rigidly fixed along the lower face and along the side surface of the cylinder. Calculations are made for 5 standard sizes of grounding conductors. Maps of the distribution of stresses in the metal structure of the ground electrode (the rod and petals-emphasis) are received, the movements of the ground electrode in the soil mass are determined. The dependences between the maximum equivalent stresses in the ground electrode lobes and the value of vertical displacement in the ground base are established, as well as the amount of movement of the earthing pad, at which the effective equivalent voltages reach critical values in the area where the paddles are adjacent to the rod.

Key words: ground electrode system; permafrost soil; strength; finite element method

Введение

Для защиты объектов нефтегазовой промышленности от перенапряжений широкое распространение получили вертикальные заземлители, эксплуатируемые в инфраструктуре газо- и нефтедобычи, а также магистрального транспорта углеводородов [1–4]. В ходе эксплуатации вертикальных заземлителей, эксплуатируемых на территориях, подверженных явлению морозного пучения грунта, выявлены случаи потерь их рабочих свойств: несоответствие параметров сопротивления растеканию тока и снижение механической прочности узлов соединения [5–10].

Проектирование и монтаж систем заземления выполняются, согласно ГОСТ Р 50571.5.54-2013/МЭК 60364-5-54:2011¹, из вертикальных заземлителей круглого сечения, соединенных между собой. К недостатку данного подхода можно отнести отсутствие элементов, препятствующих выталкиванию вертикальных электродов из грунта. В работе [11] авторами предложена новая оригинальная конструкция вертикального заземлителя с лепестками-упорами, ограничивающими вертикальные перемещения по направлению «вверх» к дневной поверхности. Основополагающей характеристикой заземлителя², определяющей его эксплуатационную пригодность в условиях вечномерзлых грунтов, является механическая прочность [12] его элементов — стержня и раскрывающихся лепестков-упоров. В процессе эксплуатации заземлитель испытывает значительные нагрузки, связанные с морозным пучением грунтов. Выталкивающие усилия приводят к возникновению критических механических напряжений и деформаций в упорных лепестках, в особенности, в зонах их присоединения к заземляющему стержню [13–14].

¹ ГОСТ Р 50571.5.54-2013/МЭК 60364-5-54:2011. Электроустановки низковольтные, часть 5-54. Выбор и монтаж электрооборудования. Заземляющие устройства, защитные проводники и проводники уравнивания потенциалов [Электронный ресурс]. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 46 с.

² ZZ-100-102-6МВ-ГН 219. (Вертикальный) комплект электролитического заземления [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.zandz.ru/zz-100-102-6mv-gn219.html>.

Поэтому авторским коллективом была поставлена задача определить значения максимально допустимых перемещений рассматриваемого стержневого заземляющего устройства. Для выбора оптимальной конструкции упорных лепестков необходимо также установить зависимости между максимальными действующими напряжениями в конструкции и соответствующими перемещениями заземлителя по направлению «выталкивания» из грунта.

Объект и методы исследования

Рассматриваемый в статье заземлитель вертикального направления для вечномёрзлых грунтов представляет собой конструкцию, состоящую из заостренного на конце металлического стержня 1 (рис. 1), лепестков 2 и оси 3.

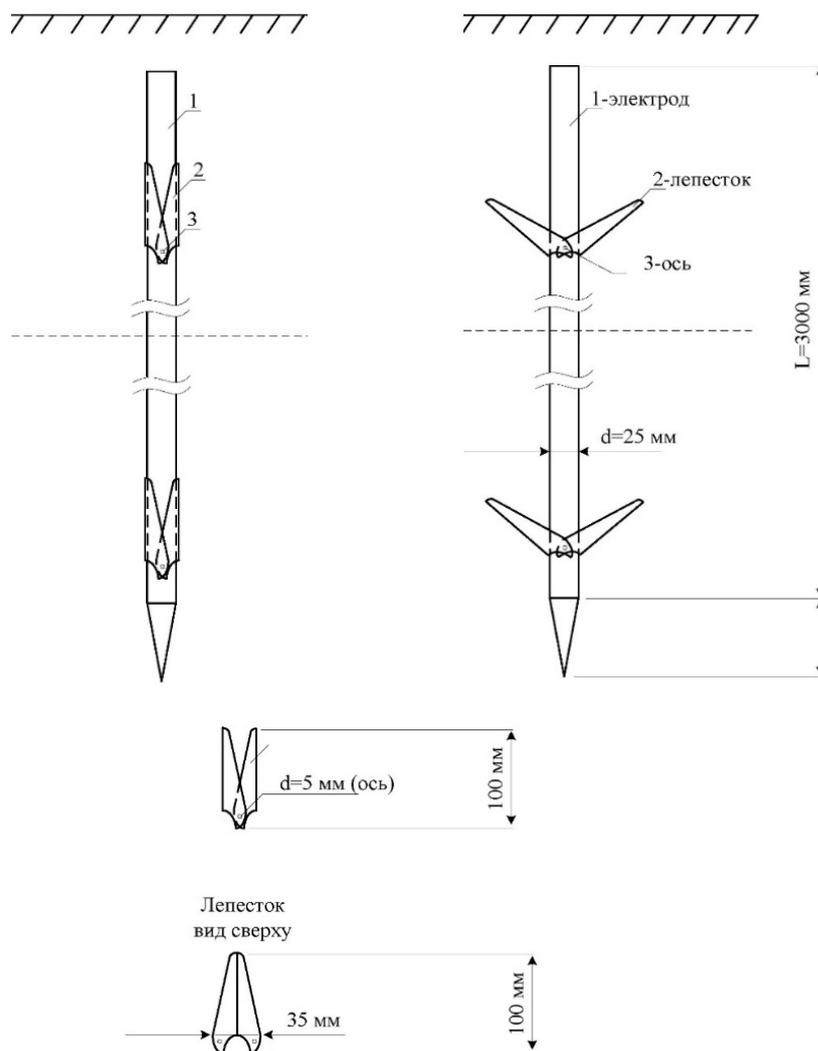


Рис. 1. Устройство вертикального заземлителя для вечномёрзлых грунтов:
1 — стержень; 2 — лепестки; 3 — ось

Пары лепестков смонтированы на металлическом стержне посредством осей. Количество и тип лепестков зависят от различных характеристик грунтов основания, таких как водонасыщенность, глубина оттаивания грунта, льдистость, влажность и др.

Принцип работы заземлителя вертикального направления для вечномерзлых грунтов заключается в следующем: при оттаивании вышележащих толщ грунта, вызванном увеличением температуры окружающей среды [15, 16], стрежень поднимается на дневную поверхность [17]. Поднятие стержня происходит в результате действия выталкивающих сил $Q_{\text{выт}}$, которые возникают за счет движения вечномерзлого грунта и миграции грунтовой влаги. За счет того что лепестки установлены на металлическом стержне путем применения оси, в нижней их части относительно дневной поверхности почвы между лепестками и стержнем забивается грунт, и лепестки открываются, препятствуя выталкиванию стержня.

Для решения поставленных задач предлагается использовать конечно-элементный программный комплекс ANSYS [18–20], позволяющий на основе модели «грунт — заземлитель» выполнить анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкции с учетом физических характеристик грунта. Метод конечных элементов (МКЭ) является перспективным и наиболее подходящим для решения задач деформирования, представленных в виде системы дифференциальных уравнений. Данный метод позволяет проводить детальный анализ НДС конструкций.

МКЭ основан на идее разбиения исследуемого объекта на конечное число областей — конечные элементы (КЭ). Для каждой области задается некоторый интерполирующий полином. Задание функции формы позволяет определить перемещения внутри области на основе перемещений внутри ее узловых соединений (точек). Узловые соединения являются точками пересечения границ КЭ.

Теория МКЭ основана на принципе возможных перемещений Лагранжа. При стремлении работы потенциальной энергии деформирования к нулю получается дифференциальное уравнение Эйлера — Лагранжа, приближенное решение которого определяется по способу Ритца, Бубнова — Галеркина, Рэлея. Найти точное решение уравнения Эйлера — Лагранжа при реальной неосесимметричной постановке задачи не представляется возможным.

Алгоритм решения задач деформирования металлоконструкций численным методом — методом конечных элементов в ПК ANSYS имеет следующую структуру.

1. Разработка геометрии модели исследуемого объекта в модуле программного комплекса — DesignModeller.

2. Искомая металлоконструкция дифференцируется на дискретные участки (конечные элементы — КЭ), имеющие определенную форму. В узловых точках пересечения границ данных участков каждый элемент обладает конечным числом степеней свободы.

3. Задаются параметры дискретизации конечно-элементной сетки, образованной границами участков, на которые разбит объект.

4. Выбирается тип конечного элемента для каждой конструктивной части исследуемого объекта. Для каждого КЭ определяется функция формы для обеспечения связи вектора узловых перемещений с общим вектором перемещений в любой точке участка.

5. Для каждого конструктивного элемента объекта задаются материал и его свойства. При задании свойств выбранного материала определяется модель его поведения — упругий, упругопластический, пластический, билинейный и пр.

6. В случае решения контактной задачи задаются контактные пары, выбирается тип контакта.

7. Задаются граничные условия — нагрузки, воздействия, связи, заземления и др.

8. Выбираются вид анализа и способ решения системы дифференциальных уравнений, устанавливаются параметры вычислительного процесса — число повторений, число ступеней нагружения и др.

9. Формируется и решается система линейных алгебраических уравнений, определяются необходимые разрешающие функции в узловых соединениях системы.

10. Вычисляются составляющие напряженно-деформированного состояния для каждого из конечных элементов исследуемого тела в соответствии с найденными значениями разрешающих функций в узловых точках модели системы.

В результате разделения исходной модели тела на конечные элементы формируется сетка из границ КЭ с узлами. Форма деформируемого объекта и вид его НДС определяют выбор размеров, формы и типа конечных элементов модели. Трудоемкость вычислений сводится к минимуму за счет определения параметров выбранного элемента в местной системе координат. Местная система отсчета и система координат, в которой заданы перемещения объекта и внешние силы в общем, имеют отличия. При вычислении требуемых физических величин также требуется задать материал для КЭ и его физические и механические характеристики.

При решении задач деформирования необходимым условием является задание упругих свойств материала — модуля деформации и коэффициента Пуассона. В том случае, когда деформации объекта являются пластическими, требуется задать реальную кривую деформирования металла. Характеристикой состояния исследуемого объекта является число степеней свободы в узловых точках конечных элементов, перемещения и координаты которых можно определить в локальной или глобальной системе отсчета. Матрицу жесткости произвольного элемента удобно вычислить в местной системе координат. Если начало координат совместить с какой-либо из вершин элемента, а также выбрать направление одной из координатных осей параллельным либо совпадающим с направлением какой-либо грани рассматриваемого элемента, то при вычислении матрицы жесткости в местной координатной системе можно достичь заметных преимуществ. Матрица жесткости в этих случаях получается наиболее простой. Одновременно с этим при расчете конечно-элементной модели, приближенно описывающей реальный

объект, требуется выбрать неподвижную глобальную систему координат. Вполне естественно здесь возникает необходимость найти решение задачи, удовлетворяющее заданной общей системе отсчета.

Точность вычислений МКЭ напрямую зависит от количества конечных элементов. В случае, если изменение величин напряжений, возникающих в модели, несущественно, то общее число КЭ влияет на достоверность вычислений незначительно. При этом исследователями отмечается, что при различных размерах КЭ, находящихся в окрестностях зоны концентраторов напряжений, достоверность результатов анализа НДС объекта существенно снижается. Граничные условия прикладываются только к узлам. Максимальное количество граничных условий эквивалентно числу независимых параметров (обобщенных координат) в узловой точке.

Экспериментальная часть

Первым этапом моделирования является разработка расчетной схемы системы (рис. 2) «грунт — заземлитель», которая должна максимально точно отражать геометрические параметры заземлителя и его элементов, направления и величины действующих нагрузок, свойств стали и грунта.

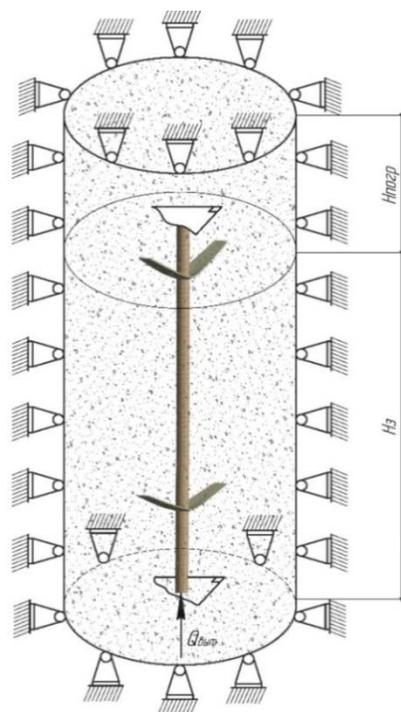


Рис. 2. Предлагаемая расчетная схема «грунт — заземлитель»

Для построения модели принят запатентованный заземлитель [11] длиной 5 метров, имеющий 2 попарно установленных лепестка-упора, расстояние между которыми составляет 2 метра. Верхняя пара лепестков-упоров расположена на расстоянии 0,5 м от верхней точки заземляющего стержня (конструкция представлена на рис. 1). Марка стали стержня заземлителя и лепестков — сталь 45 с пределом текучести 355 МПа. Для определения оптимальных размеров лепестков-упоров с точки зрения обеспечения условий прочности предлагается к расчетам 5 типоразмеров: 100×35; 120×38; 140×42; 170×46 и 200×50. Для создания матрицы уравнений требуется разбить модель на конечно-элементную сетку, которая будет сгенерирована на геометрической модели объекта. Для каждой конструктивной части модели задаются функция формы и вид конечного элемента.

Для моделирования лепестков-упоров был выбран четырехузловой КЭ типа SHELL181. Выбранный конечный элемент имеет 6 степеней свободы в каждой узловой точке пересечения границ КЭ и обладает линейно-упругими, гиперупругими, упругопластическими свойствами и свойствами

ползучести. Данный КЭ позволяет реализовать теорию оболочек Миндлина — Рейсснера — теорию сдвиговых деформаций первого порядка. При решении задач в нелинейной постановке искомый элемент позволяет учесть изменение толщины тонкостенной оболочки.

Металлический стержень смоделирован гексаэдрическим трехмерным квадратичным элементом SOLID186. Данный тип КЭ имеет 20 узловых точек и свободное направление в пространстве, также допускает применение нерегулярной формы конечно-элементной сетки. К свойствам конечного элемента SOLID186 относятся ползучесть, значительные перемещения и деформации, пластичность, изменение жесткости под воздействием нагрузок.

Модель грунта, в котором находится заземлитель в проектном положении, ограничена массивом высотой 10 метров и диаметром 6 метров. Для расчета НДС конструкции заземлителя принята модель грунтового массива Друкера — Прагера, согласно условию прочности которого при увеличении пластических деформаций поверхность текучести остается неизменной. Так, материал удастся представить в виде идеализированной упругопластической модели. При моделировании работы грунтов основания принято условие прочности Мизеса, согласно которому эквивалентное напряжение определяется с учетом гидростатического обжатия материала. Данный критерий позволяет учесть реальный механизм деформации грунтов в основании.

В таблице приведены физико-механические характеристики грунта, в котором заглублен заземлитель на проектную глубину.

Основные физико-механические характеристики грунтов для моделируемых участков основания

Характеристика	Единица измерения	Искусственно уплотненный песчано-глинистый грунт
Модуль упругости, E	МПа	30
Коэффициент Пуассона, μ	—	0,3
Плотность, ρ	кг/м ³	1 650
Сцепление, c	кПа	2,9
Угол внутреннего трения, φ	град	27

Для модели грунта выбран 10-узловой конечный элемент SOLID187, имеющий 3 степени свободы в каждом узловом соединении и поддерживающий большие деформации. В модели учитываются 3 контактных условия: 1) связанный контакт «bonded» между стержнем и лепестками — «edge to face» (данный контакт можно характеризовать как сварной шов); контакт с проскальзыванием «no separation» для контактных пар: 2) «стержень — грунт» — «face to body» и 3) «лепестки — грунт» — «face to body».

Следующим этапом был выполнен процесс дискретизации модели конечно-элементной сеткой. Для модели грунта использована треугольная сетка, для заземлителя — четырехугольные конечные элементы. В зонах контакта выполнялось сгущение сетки до 20 раз.

Заключительным этапом при настройке решателя является задание граничных условий и действующих нагрузок. Граничные условия для модели следующие: массив грунта в форме цилиндра диаметром 6 метров и высотой 10 метров жестко закреплен по нижней грани и по боковой поверхности цилиндра.

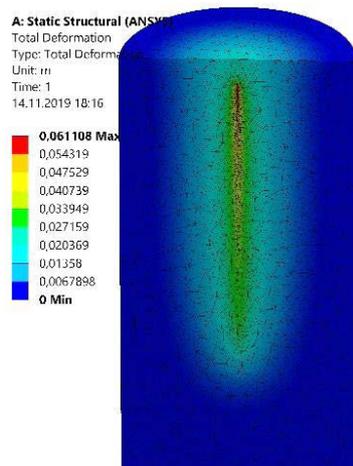


Рис. 3. Деформации в зоне контакта заземлителя и грунтового массива

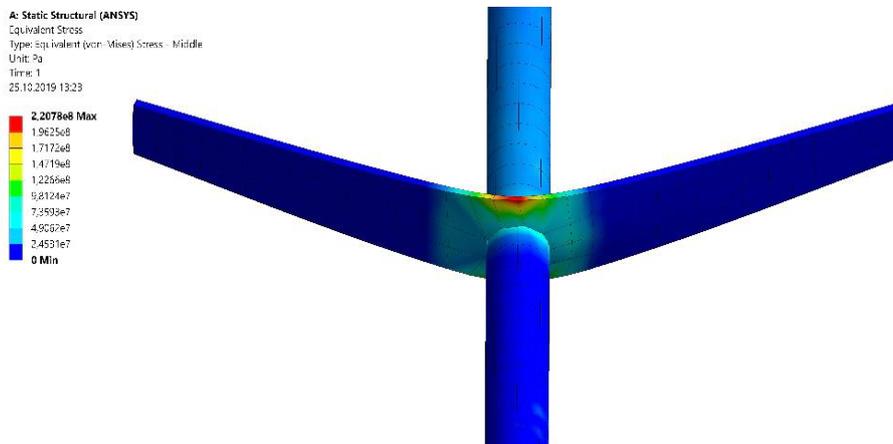


Рис. 4. Напряжения в узле присоединения лепестка к телу стержня

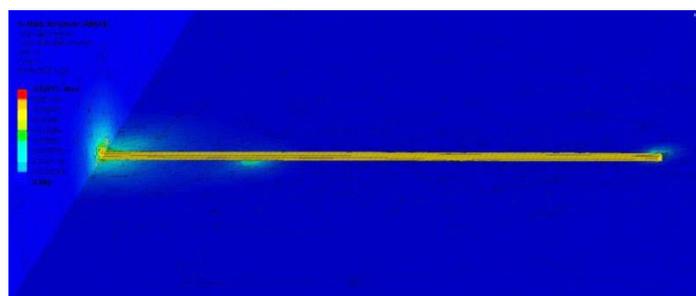


Рис. 5. Перемещения заземлителя в грунтовой массе (фронтальный разрез)

Так как выталкивающая нагрузка, действующая на стержень, не известна и достоверно определить ее значение не представляется возможным, поэтому предлагается воспользоваться программной функцией «displacement», которая позволяет принудительно задать перемещение стержня в необходимом направлении (в нашем случае «вверх» — к дневной поверхности). Функция заданного перемещения «displacement» применена к боковой поверхности стержня.

Результаты

По результатам конечно-элементного моделирования были получены карты распределения действующих эквивалентных напряжений стержня и лепестков заземлителя, карты распределения деформаций грунтового массива и заземлителя (рис. 3–5).

Обсуждение

Этап постпроцессинговой обработки результатов конечно-элементных вычислений позволил получить зависимости максимальных напряжений в лепестках-упорах от величины вертикального перемещения по направлению «вверх» для 5 типов заземлителей (рис. 6).

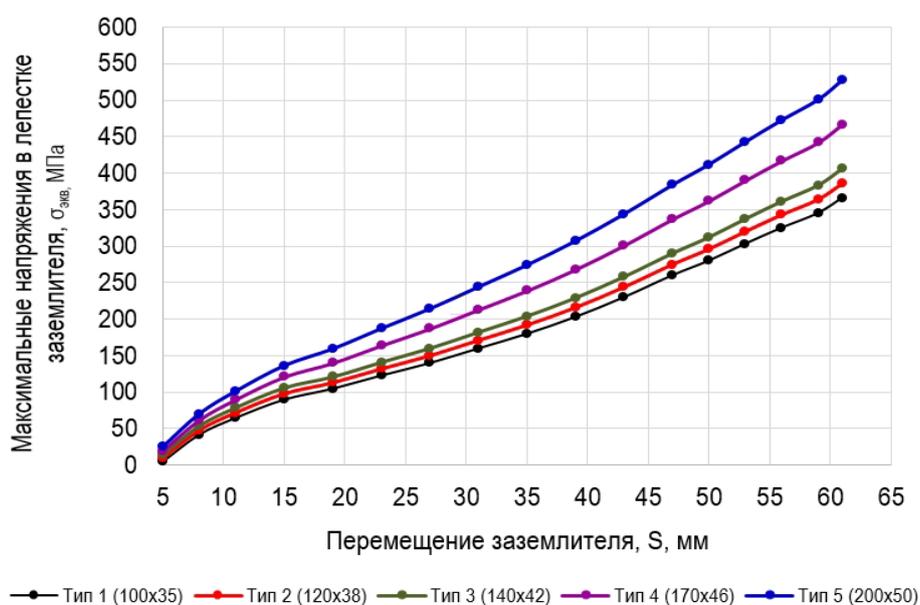


Рис. 6. Зависимости между максимальными эквивалентными напряжениями в лепестках заземлителя и величиной вертикального перемещения в грунтовой основе для 5 типов заземлителей

Наибольшие напряжения были получены в образце № 5, имеющем линейные размеры лепестков 200×50. Наименьшие напряжения при тех же значениях вертикальных перемещений были получены в образце № 1 с размерами лепестков 100×35.

Выводы

В результате расчетов были получены следующие параметры НДС системы «грунт — заземлитель»:

- наибольшие напряжения в лепестках возникают в зоне присоединения к основному телу стержня;
- величину перемещения заземлителя $\Delta S = 55$ мм можно считать критерием, при превышении которого лепестки-упоры предложенной конструкции претерпевают разрушение для принятых грунтовых условий;
- при превышении величины заданного перемещения на величину $S > 55$ мм в зоне примыкания лепестков к стержню действующие эквивалентные напряжения достигают критических значений для стали $45 \sigma_{\text{экв}} > 355$ МПа.

Библиографический список

1. Сухачев, И. С. Разработка программного алгоритма эффективной молниезащиты / И. С. Сухачев, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–2. – С. 291–295.
2. Анчарова, Т. В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений : учебник для студентов вузов / Т. В. Анчарова, М. А. Рашевская, Е. Д. Стебунова. – Москва : Форум, 2012. – 416 с. – Текст : непосредственный.
3. Кабышев, А. В. Расчет и проектирование систем электроснабжения объектов и установок : учебное пособие / А. В. Кабышев, С. Г. Обухов ; Томский политехнический университет. – Томск : ТПУ, 2006. – 248 с. – Текст : непосредственный.
4. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение объектов строительства : учебное пособие / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Ульяновский государственный технический университет. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 404 с. – Текст : непосредственный.
5. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике : учебник для вузов / А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Р. К. Борисов, И. П. Кужекин ; под редакцией А. Ф. Дьякова. – Москва : МЭИ, 2016. – 543 с. – Текст : непосредственный.
6. Вагин, Г. Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебник для студентов вузов / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, А. А. Севостьянов. – Москва : Академия, 2010. – 223 с. – Текст : непосредственный.
7. Зотов, Б. И. Безопасность жизнедеятельности на производстве : учебник для студентов вузов / Б. И. Зотов, В. И. Курдюмов. – Текст : непосредственный. – Москва : Колос, 2003. – 432 с.
8. Веревкин, В. Н. Электростатическая искробезопасность и молниезащита / В. Н. Веревкин, Г. И. Смелков, В. Н. Черкасов ; Московский институт энергобезопасности и энергосбережения. – Москва: МИЭЭ, 2006. – 170 с. – Текст : непосредственный.
9. Алиев, И. И. Электротехника и электрооборудование : справочник / И. И. Алиев. – Москва : Высшая школа, 2010. – 1199 с. – Текст : непосредственный.

10. Маньков, В. Д. Защитное заземление и зануление электроустановок : справочник / В. Д. Маньков, С. Ф. Заграничный. – Санкт-Петербург : Политехника, 2005. – 400 с. – Текст : непосредственный.
11. Патент на полезную модель № 170150 U1. Российская Федерация. МПК H01R 4/62015. Вертикальный заземлитель для вечномёрзлых грунтов : № 2015157350 : заявл. 30.12.2015 : опубл. : 17.04.2017 / Сухачев И. С., Смирнов О. В., Копырин В. А. : патентообладатель Тюменский индустриальный университет. – Текст : непосредственный.
12. Карякин, Р. Н. Нормы устройства сетей заземления / Р. Н. Карякин. – Москва : ЗАО «Энергосервис», 2002. – 240 с. – Текст : непосредственный.
13. Оценка эффективности работы анкерных противопучинных свай в условиях многолетнемерзлых грунтов / А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, П. В. Чепур, А. В. Юргевич. – Текст : непосредственный // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 11–2. – С. 411–416.
14. Сухачев, И. С. Общие вопросы и проблемы нормативной документации по молниезащите и заземлению на объектах топливно-энергетического комплекса / И. С. Сухачев, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 3–2. – С. 301–304.
15. Тарасенко, А. А. Закономерности деформирования металлоконструкций крупногабаритного вертикального сварного резервуара при наличии зон проседания основания / А. А. Тарасенко, А. А. Грученкова, П. В. Чепур. – Текст : непосредственный // Трубопроводный транспорт : теория и практика. – 2016. – № 1 (53). – С. 32–37.
16. Study of stress-strain state of pipeline under permafrost conditions / A. A. Tarasenko, M. N. Redutinskiy, P. V. Chepur, A. A. Gruchenkova. – Текст : электронный // Journal of Physics : Conference Series. – 2018. – Vol. 1015. – URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032048>.
17. Зубов К. Н. Совершенствование расчетных методов молниезащиты и заземляющих устройств в неоднородных грунтах : специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» : автореферат диссертации на соискание кандидата технических наук / Зубов Кирилл Николаевич. – Липецк, 2011. – 16 с. – Место защиты : Липецкий государственный технический университет. – Текст : непосредственный.
18. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; пер. с англ., под ред. Б. Е. Победри. – Москва : Мир, 1975. – 541 с. – Текст : непосредственный
19. Лаевский, Ю. М. Метод конечных элементов (основы теории, задачи) / Ю. М. Лаевский. – Новосибирск : Новосибирский государственный университет, 1999. – 166 с. – Текст : непосредственный.
20. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учебное пособие / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова [и др.] ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Самарский государственный технический университет. – Самара : СамГТУ, 2010. – 271 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Sukhachev, I. S., & Chepur, P. V. (2014). Software development algorithms for effective lightning protection. Fundamental research, (11-2), pp. 291-295. (In Russian).

2. Ancharova, T. V., Rashevskaya, M. A., & Stebunova, E. D. (2012). *Elektrosnabzhenie i elektrooborudovanie zdaniy i sooruzheniy*. Moscow, Forum Publ., 416 p. (In Russian).
3. Kabyshev, A. V., & Obukhov, S. G. (2006). *Raschet i proektirovanie sistem elektrosnabzheniya ob'ektov i ustanovok*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 248 p. (In Russian).
4. Shcherbakov, E. F., Aleksandrov, D. S., & Dubov, A. L. (2011). *Elektrosnabzhenie ob'ektov stroitel'stva*. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University Publ., 404 p. (In Russian).
5. D'yakov, A. F., Maksimov, B. K., Borisov, R. K., & Kuzhekin, I. P. (2016). *Elektromagnitnaya sovместimost' i molniezashchita v elektroenergetike*. Moscow, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" Publ., 543 p. (In Russian).
6. Vagin, G. Ya., Loskutov, A. B., & Sevost'yanov, A. A. (2010). *Elektromagnitnaya sovместimost' v elektroenergetike*. Moscow, Akademiya Publ., 223 p. (In Russian).
7. Zotov, B. I., & Kurdyumov, V. I. (2003). *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti na proizvodstve*. Moscow, Kolos Publ., 432 p. (In Russian).
8. Verevkin, V. N., & Cherkasov, V. N. (2006). *Elektrostaticheskaya iskrobezopasnost' i molniezashchita*. Moscow, 170 p. (In Russian).
9. Aliev, I. I. (2010). *Elektrotehnika i elektrooborudovanie*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1199 p. (In Russian).
10. Man'kov, V. D., & Zagranichnyy, S. F. (2005). *Zashchitnoe zazemlenie i zanulenie elektroustanovok*. St. Petersburg, Politehnika Publ., 400 p. (In Russian).
11. Sukhachev, I. S., Smirnov, O. V., & Kopyrin, V. A. *Vertikal'nyy zazemlitel' dlya vechnomerzlykh gruntov* Pat. na poleznuyu model' RF 170150 U1. MPK H01R 4/62015. No. 2015157350. Applied: 30.12.2015. Published: 17.04.2017 (In Russian).
12. Karyakin, R. N. (2002). *Normy ustroystva setey zazemleniya*. Moscow, "Energoservis" JSC Publ., 240 p. (In Russian).
13. Tarasenko, A. A., Gruchenkova, A. A., Chepur, P. V., & Yurgevich, A. V. (2016). Assessment of anchor unheaving piles effectiveness in the conditions of permafrost soils. *Advances in current natural sciences*, (11-2), pp. 411-416. (In Russian).
14. Sukhachev, I. S., & Chepur, P. V. (2016). General issues and challenges normative documentation on lightning protection and grounding on objects of fuel and energy complex. *Fundamental research*, (3-2), pp. 301-304. (In Russian).
15. Tarasenko, A. A., Gruchenkova, A. A., & Chepur, P. V. (2016). The regularities of large vertical tank's metal structures deformations in the presence of subsidence foundation zones. *Pipeline Transport: Theory and Practice* (1(53)), pp. 32-37. (In Russian).
16. Tarasenko, A. A., Redutinskiy, M. N., Chepur, P. V., & Gruchenkova, A. A. (2018). Study of stress-strain state of pipeline under permafrost conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1015. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032048>
17. Zubov, K. N. (2011). *Sovershenstvovanie raschetnykh metodov molniezashchity i zazemlyayushchikh ustroystv v neodnorodnykh gruntakh*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Lipetsk, 16 p. (In Russian).
18. Zienkiewicz, O. C. (1971). *The finite element method in engineering science*. New York, McGraw-Hill, 521 p. (In English).

19. Laevskiy, Yu. M. (1999). Metod konechnykh elementov (osnovy teorii, zadachi). Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 166 p. (In Russian).

20. Bruyaka, V. A., Fokin, V. G., Soldusova, E. A., Glazunova, N. A., & Adeyanov, I. E. (2010). Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench. Samara, Samara State Technical University Publ., 271 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Сухачев Илья Сергеевич, к. т. н., доцент кафедры электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Чепур Петр Владимирович, к. т. н., доцент кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, e-mail: chepurpv@tyuiu.ru

Тарасенко Александр Алексеевич, д. т. н., профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Грученкова Алеся Анатольевна, ассистент кафедры нефтегазового дела, филиал Тюменского индустриального университета, г. Сургут

Гуань Юхай, д. т. н., Китайский нефтяной университет, г. Циндао, Китай

Information about the authors

Ilya S. Sukhachev, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Electric Power Engineering, Industrial University of Tyumen

Petr V. Chepur, Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, e-mail: chepurpv@tyuiu.ru

Aleksandr A. Tarasenko, Doctor of Engineering, Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Alesya A. Gruchenkova, Assistant at the Department of Oil and Gas Industry, Industrial University of Tyumen (Surgut branch)

Yuhai Guan, Doctor of Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, China